

Properties of On-Line Partial Discharge in Hydrogenerator Stator Windings

金熙東[†] · 金秉漢^{*}

(Hee-Dong Kim · Byong-Han Kim)

Abstract - During normal machine operation, partial discharge(PD) tests were performed with partial discharge analyzer(PDA) in two hydrogenerators. Six cable couplers were installed in circuit ring bus and endwinding of three phases. PDA showed that the normalized quantity number(NQN) and the partial discharge magnitude(Q_m) were very low in hydrogenerator #1 and #2, respectively. The trend analyses of NQN and Q_m value are available for monitoring of the insulation condition in hydrogenerator stator windings. The insulation condition of stator winding can be assessed. Discharge at conductor surface was discovered in B phase(C2 coupler) of hydrogenerator #1. Internal discharges were generated in A and C phases(C2 coupler) of hydrogenerator #1 and in A, B and C phases(C1 and C2 couplers) of hydrogenerator #2. Slot discharges occurred in A, B and C phases(C1 coupler) of hydrogenerator #1. The stator windings of two hydrogenerators were in good condition.

Key Words : Partial Discharge, Hydrogenerator, Normalized Quantity Number, PD Magnitude, Stator Winding

1. 서 론

발전기 고정자 권선으로 사용되는 절연재료 내부에 보이드(void)와 같은 결함이 생성됨에 따라 도체에 인가된 고전압의 영향으로 인해 부분방전(partial discharge)이 발생한다. 보이드는 제작할 때부터 존재하거나 혹은 장기간 운전되는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 열화가 복합적으로 작용함에 따라 최종적으로 절연파괴에 도달한다. 운전중인 발전기의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고 단시간에 복구가 곤란하기 때문에 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다.

부분방전은 절연열화 정도를 나타내는 표시 인자이며, 운전중(on-line)에 부분방전 펄스수, 크기 및 패턴 등을 종합적으로 분석하여 절연상태를 평가하고 있다[1~3]. 수력발전기 고정자 권선을 운전중에 진단하는 PDA(partial discharge analyzer) 장비가 1976년 캐나다에서 개발됨에 따라 북미를 중심으로 부분방전을 측정하기 위해서 케이블 커플러(cable coupler)센서를 설치하고 주기적으로 진단을 수행하고 있다[4, 5]. PDA장비는 절연재료 내부의 국부적인 절연열화 상태를 파악하기 위해 NQN(normalized quantity number)과 최대부분방전 크기(Q_m , mV)를 측정하여 부분방전 패턴과 추이(trend)를 분석함으로써 사전에 결함정도를 예측할 수 있다.

본 논문에서는 35년 이상 동안 운전된 2대의 수력발전기(정격전압 11kV, 25MVA) 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 운전중과 정지중 진단시험을 수행하였다. 최근 4년 동안 주기적으로 운전중에 PDA를 이용하여 NQN과 Q_m 의 크기를 측정하고 부분방전 패턴과 추이를 분석함으로써 수력발전기 고정자 권선의 절연상태가 매우 양호하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

2. 실험방법

2.1 운전중 진단시험

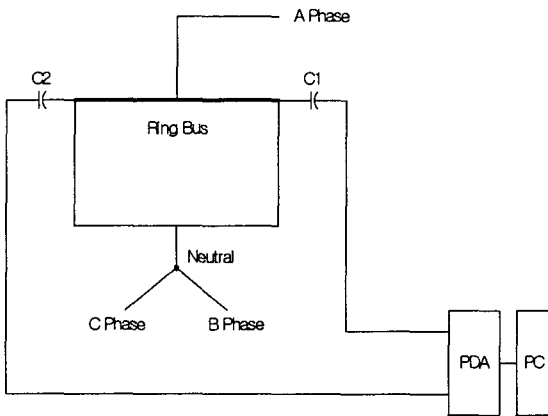
운전중 진단시험은 수력발전기 고정자 권선의 건전성을 평가하기 위해 운전중에 부분방전을 측정하여 절연상태를 분석한다. 그림 1 (a)는 11kV급 수력발전기(25MVA) 고정자 권선 A상에 설치된 2개의 케이블 커플러 센서(C1, C2, 80pF)를 나타냈으며, A상과 마찬가지로 B상과 C상도 각각 2개씩 총 6개 센서를 설치하였다. 6개의 케이블 커플러 센서에서 부분방전을 측정할 수 있도록 동축케이블을 인출하고 부분방전 분석기(partial discharge analyzer: PDA-IV, IRIS Power Engineering)와 노트북 컴퓨터(notebook computer)를 연결하여 NQN, Q_m 의 크기 및 부분방전 패턴을 분석하고 주기적인 추이 관리를 통해 절연열화 상태를 평가하였다. 그리고 링버스(ring bus)는 여러 개의 권선을 연결한 부분을 나타내고 있다.

PDA는 부분방전 펄스수, 크기 및 위상을 2차원 및 3차원으로 표시할 수 있으며, 부분방전 패턴을 분석하여 결함발생 원인을 예측할 수 있다. PDA의 주파수 대역은 0.1~350 MHz(-3dB), 측정범위는 $\pm 20 \sim \pm 4000$ mV, 부분방전 시물레이

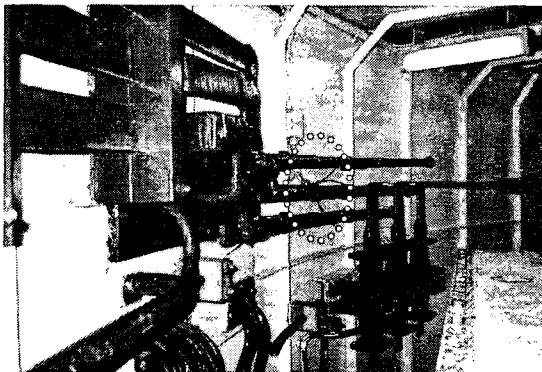
[†] 교신저자, 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博
E-mail : hdkim@kepri.re.kr

^{*} 正會員 : 韓電 電力研究院 責任專門員
接受日字 : 2005年 12月 20日
最終完了 : 2006年 2月 15日

터가 내장되어 있고 소프트웨어는 Windows 95와 98을 사용할 수 있다. 1ns 만큼 짧은 라이즈 타임(rise-time)을 갖는 부분방전 펄스도 측정이 가능하며, 전형적으로 발전기와 고압 전동기 고정자 권선의 부분방전은 1~5ns의 라이즈 타임을 갖는다[6]. 그림 1 (b)에서 점선으로 나타낸 타원형 부분이 수력발전기 A, B, C상 링버스측에 실제로 설치된 케이블 커플러를 나타내고 있다.



(a) 부분방전 센서 설치 및 측정회로도



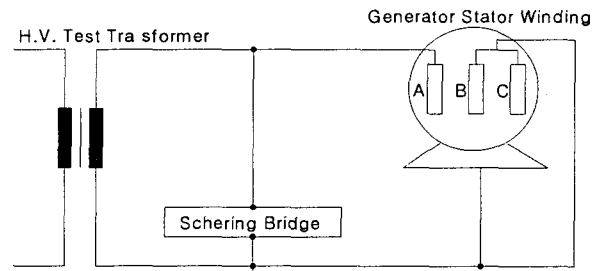
(b) 케이블 커플러 센서

그림 1 수력발전기 운전중 진단시험
Fig. 1 On-line diagnostic test of hydrogenerator

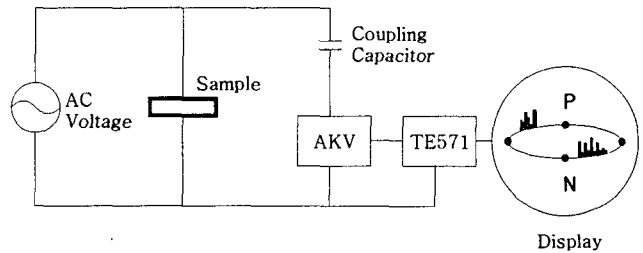
2.2 정지중 진단시험

정지중 진단시험은 수력발전기 고정자 권선의 건전성을 평가하기 위해 정지중에 교류전류, 유전정접 및 부분방전을 측정하여 절연상태를 분석한다. 수력발전기 고정자 권선의 정지중 진단시험을 위해 그림 2와 같이 고전압 장비(high voltage transformer), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기(digital partial discharge detector)를 사용하였다. 그림 2 (a)에 나타난 바와 같이 고전압 장비는 셰링브리지(Schering bridge, Tettex Instruments), 전원장치(HV supply, Tettex Instruments Type 5283), 브리지(bridge, Tettex Instruments Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Tettex Instruments Type 5285)로 구성되어 있으며, 수력발전기 각 상별로 교류전류와 유전정접을 측정하였다. A상을 측정할 때 B상과 C상은 접지에 연결하고

B상을 측정할 때 A상과 C상은 접지에 연결하며, C상을 측정할 때 A상과 B상은 접지에 연결한다. 그림 2 (b)는 수력발전기 고정자 권선에 전원장치(AC voltage supply)를 연결하여 교류전압을 인가하면서 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)를 통해 유입된 신호를 커플링 유니트(coupling unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments TE 571)에서 각 상별로 방전크기 및 패턴(display)을 측정하였다. 수력발전기 A상에서 부분방전을 측정할 때 그림 2 (b)의 샘플(sample)에 A상의 고정자 권선을 연결하고 B상과 C상은 접지에 연결하며, B상과 C상도 A상과 마찬가지로 측정한다.



(a) 교류전류 및 유전정접 측정



(b) 부분방전 측정

그림 2 수력발전기 정지중 진단시험
Fig. 2 Off-line diagnostic test of hydrogenerator

3. 결과 및 고찰

3.1 운전중 진단

2대의 수력발전기 고정자 권선에서 운전중 부분방전 특성을 분석하여 절연열화 상태를 평가하기 위해 PDA를 사용하여 NQN과 최대부분방전 크기(Qm)의 측정결과를 표 1에 나타내었다. NQN과 Qm의 크기를 분석한 결과 수력발전기 2호기에 비해 1호기가 대략적으로 낮게 나타났다. 표 1, 그림 3, 그림 4 및 그림 5는 1분 동안 부분방전을 측정하여 교류 한 주기에 표시하였으며, PDA를 사용하여 측정된 결과를 원문대로 나타내었다. 그림 3 (a), 4 (a) 및 5 (a)는 부분방전 펄스수와 크기를 2차원으로 분석하고 그림 3 (b), 4 (b) 및 5 (b)는 부분방전 펄스수, 크기 및 위상을 3차원으로 나타내었다.

그림 3에 나타난 바와 같이 수력발전기 1호기의 B상-C2 커플러는 정극성 펄스(positive pulse)에 비해 부극성 펄스(negative pulse)가 크게 나타났으며, 정극성에 비해 부극성의 부분방전 크기가 높기 때문에 부분방전 패턴이 도체표면에서 방전(discharge at conductor surface)으로 분석되었다. 수력

발전기가 35년 이상 동안 장기간 운전됨에 따라 동도체와 주 절연재료 사이의 경계면에서 보이드가 발생된 것으로 추정할 수 있다[7].

표 1 NQN과 Qm의 크기

Table 1 The magnitude of NQN and Qm

수력발전기			1호기 -C1	1호기 -C2	2호기 -C1	2호기 -C2
A상	NQN	+	39	79	55	191
		-	15	94	42	212
	Qm	+	31	54	56	93
		-	0	56	50	97
B상	NQN	+	45	50	43	223
		-	26	100	43	295
	Qm	+	42	37	34	109
		-	0	56	34	136
C상	NQN	+	104	77	118	253
		-	59	107	100	283
	Qm	+	73	53	65	131
		-	38	57	60	147

표 1에서 수력발전기 1호기와 2호기의 NQN과 Qm 크기 중에 C1과 C2의 차이는 2.1에서 설명한 바와 같이 고정자 권선 구조가 2병렬로 제작되어 상호 독립적으로 부분방전 신호를 검출하기 때문이다. 즉, 수력발전기 1호기와 2호기에서 C1과 C2의 차이 발생은 고정자 권선의 절연열화 정도가 다르게 나타나고 있음을 의미한다.

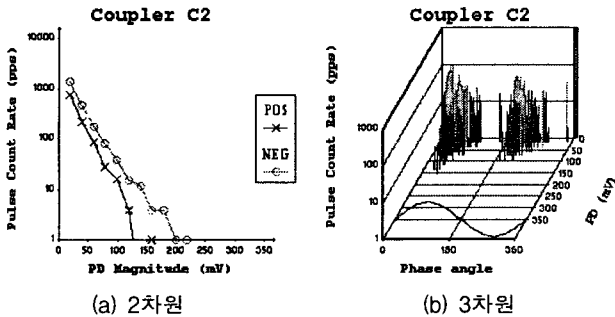


그림 3 도체표면에서 방전
Fig. 3 Discharge at conductor surface

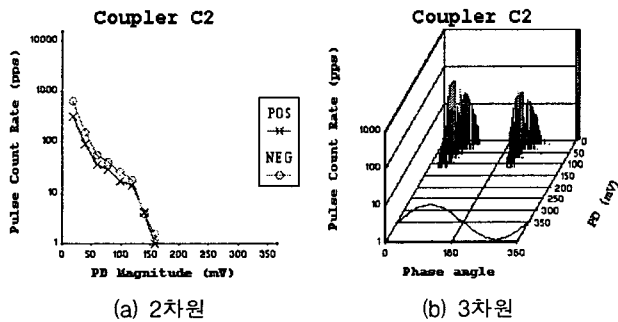


그림 4 내부방전
Fig. 4 Internal discharge

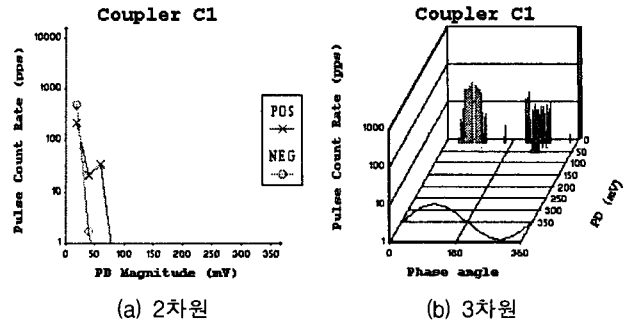


그림 5 슬롯방전
Fig. 5 Slot discharge

그림 4에 나타난 바와 같이 수력발전기 1호기의 A상-C2와 C상-C2 커플러, 수력발전기 2호기는 A, B, C상의 C1과 C2 커플러 모두 정극성 펄스와 부극성 펄스가 거의 일치하고 있으며, 표 1에 보인 바와 같이 정극성과 부극성의 부분방전 크기가 거의 동일하기 때문에 부분방전 패턴이 내부방전(internal discharge)으로 분석되었다[7]. 내부방전은 장기간 운전에 의해 주절연재료 내부의 보이드 부분에서 방전이 발생되고 있으며, 발전기 혹은 고압전동기 등에서 거의 60% 정도를 점유하고 있다.

그림 5는 수력발전기 1호기의 A상-C1, B상-C1 및 C상-C1 커플러는 모두 정극성 펄스가 부극성 펄스보다 높게 분석되었으며, 표 1에 보인 바와 같이 정극성이 부극성의 부분방전 크기보다 크기 때문에 부분방전 패턴이 슬롯방전(slot discharge)으로 나타났다[7]. 수력발전기는 빈번한 기동정지로 인해 고정자 권선이 슬롯내부에서 미세하게 이동함에 따라 반도전층 손상으로 인해 슬롯방전이 발생한 것으로 사료된다[8].

수력발전기 고정자 권선이 도체표면에서 방전, 내부방전 및 슬롯방전 등과 같은 결합을 갖고 있지만 크기가 크지 않을 뿐만 아니라 최근 4년 동안 주기적으로 반복하여 NQN과 Qm의 크기를 분석해도 거의 유사하게 나타났다. 11kV급 수력발전기 Qm의 크기가 372 [mV] 이하이면 양호하게 판정하고 있다[7]. 따라서 2대의 수력발전기 고정자 권선의 절연상태가 모두 양호하게 평가되었다.

2대의 수력발전기 고정자 권선에서 최근 4년 동안 12차례 NQN과 Qm의 추이를 측정된 결과 그림 6, 그림 7, 그림 8 및 그림 9에 나타난 바와 같이 4가지 형태로 분류할 수 있었다. 그림 6과 같은 형태는 수력발전기 1호기의 A상-C1, B상-C1 및 C상-C1 커플러, 2호기 B상-C1 커플러에서 거의 동일하게 나타났다. NQN과 Qm의 크기를 분석한 결과 정극성이 부극성 펄스에 비해 약간 크게 나타났으며, NQN과 Qm이 38mV 이하의 범위를 나타내고 있다. 그림 7과 같은 형태는 수력발전기 1호기 A상-C2와 B상-C2 커플러, 2호기 A상-C1과 C상-C1 커플러에서 거의 동일하게 나타났다. NQN은 부극성이 정극성 펄스에 비해 약간 크며, Qm의 크기는 정극성과 부극성 펄스가 거의 같은 크기를 나타내고 있다. NQN의 크기는 100이하이며, Qm의 크기는 60mV 이하를 나타내고 있다.

그림 8과 같은 형태는 수력발전기 1호기 C상-C2 커플러에

서만 나타났다. NQN은 부극성이 정극성 펄스에 비해 약간 크며, Qm의 크기는 정극성과 부극성 펄스가 거의 같은 크기를 나타내고 있다. NQN 크기는 100 이하이며, Qm의 크기는 60mV 이하를 나타내고 있다. 2003년 11월에 NQN과 Qm의 크기가 2배 이상 갑자기 증가함에 따라 절연열화가 진행되는 초기상태로 판단하여 정지중 진단시험을 수행하였으나 양호하게 분석되어 외부 노이즈에 의한 일시적인 현상으로 해석하였으며, 2004년 1월에 다시 측정한 결과 이전 데이터와 유사하게 나타났다.

그림 9와 같은 형태는 수력발전기 2호기의 A상-C2, B상-C2 및 C상-C2 커플러에서 거의 동일하게 나타났다. NQN과 Qm의 크기를 분석한 결과 부극성이 정극성 펄스에 비해 크게 나타났으며, NQN 크기는 290 이하 Qm의 크기는 150mV 이하를 나타내고 있다. NQN과 Qm의 추이를 관찰한 결과 크기가 최근 6개월 동안 대략 2~3배 이상 급격하게 증가하여 장시간 지속되면, 정비담당자는 수력발전기 고정자 권선의 절연열화로 판정하고 운전을 정지하여 절연진단 시험을 시행하거나 혹은 회전자를 인출하고 고정자 권선 내부의 육안점검을 수행하여야 한다[7].

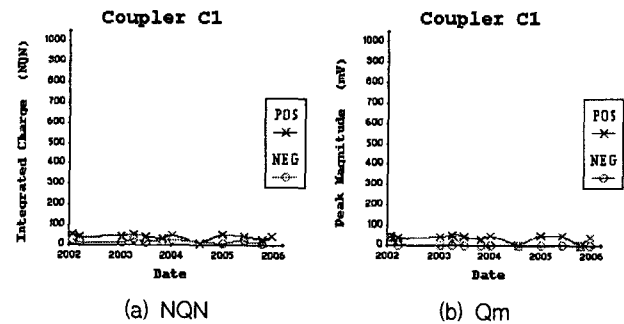


그림 6 수력발전기 1호기 A상-C1 커플러에서 NQN과 Qm의 추이

Fig. 6 Trend of NQN and Qm in A phase-C2 coupler of hydrogenerator #1

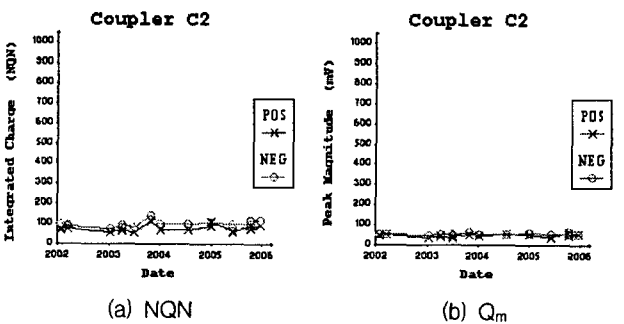


그림 7 수력발전기 1호기 A상-C2 커플러에서 NQN과 Qm의 추이

Fig. 7 Trend of NQN and Qm in A phase-C2 coupler of hydrogenerator #1

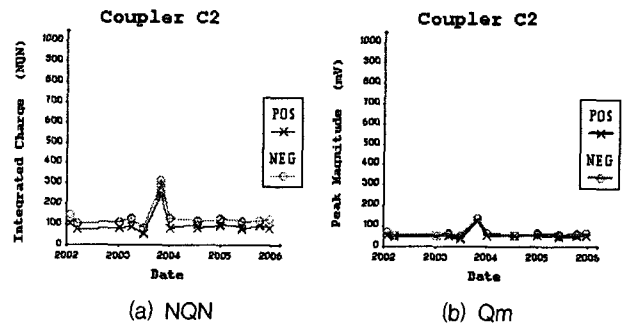


그림 8 수력발전기 1호기 C상-C2 커플러에서 NQN과 Qm의 추이

Fig. 8 Trend of NQN and Qm in C phase-C2 coupler of hydrogenerator #1

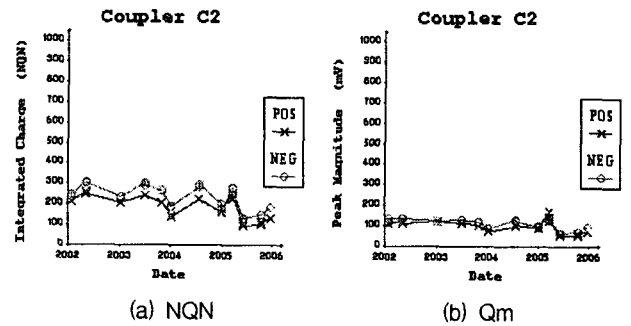


그림 9 수력발전기 2호기 C상-C2 커플러에서 NQN과 Qm의 추이

Fig. 9 Trend of NQN and Qm in C phase-C2 coupler of hydrogenerator #2

3.2 정지중 진단

그림 8에서 나타낸 바와 같이 2003년 11월에 NQN과 Qm의 크기가 2배 이상 갑자기 증가함에 따라 절연열화 상태를 확인하기 위해 운전을 정지하고 1호기 수력발전기 고정자 권선을 각 상별로 분리하여 교류전류, 유전정접 및 부분방전을 측정하였다. 11kV급 수력발전기 고정자 권선의 정지중 절연열화 판정기준은 정격전압(11kV)에서 ΔI 는 12.0% 이하, $\Delta \tan \delta$ 는 6.5% 이하 및 부분방전 크기는 상전압(6.35kV)에서 10,000pC 이하이면 양호하게 평가하고 있다[9].

그림 10은 교류전압을 수력발전기 정격전압인 11kV까지 증가시키면서 교류전류와 전압 사이의 특성을 보였으며, ΔI 가 A, B, C상에서 각각 1.01%, 1.01%, 0.55%로 양호하게 나타났다. 또한, 유전정접 특성을 분석하면 부분방전의 발생 여부, 부분방전의 개시전압 및 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있다. 그림 11은 교류전압을 11kV까지 증가시키면서 $\tan \delta$ 와 전압 사이의 특성을 나타내었으며, $\Delta \tan \delta$ 가 A, B, C상에서 각각 1.35%, 0.87%, 0.93%로 분석되었다. $\Delta \tan \delta$ 가 매우 작고 유전정접 특성이 양호하기 때문에 고정자 권선 절연재료의 내부가 양호하게 판단되었다. $\tan \delta$ -전압 특성에서 유전정접이 6kV에서 서서히 증가하고 있으며, $\tan \delta$ 증가 패턴이 크지 않기 때문에 부분방전 크기도 작을 것으로 예상할 수 있다.

부분방전을 측정할 때 계통잡음은 A, B, C상에서 각각 270pC, 520pC, 900pC이며, 부분방전 개시전압이 A, B상에서는 발생하지 않고 C상에서만 9.8kV로 나타났다. 정격전압 11kV에서 부분방전 크기는 A, B, C상이 각각 350pC, 780pC, 1,700pC으로 낮게 측정되었다. 표 1에 나타난 바와 같이 운전 중 진단결과와 마찬가지로 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 측정된 부분방전의 크기가 A상에서 가장 작고 C상에서 가장 높게 나타났다. 정격전압에서 측정된 부분방전 패턴은 A, B, C상 모두 슬롯방전이 우세하게 나타났다. 따라서 교류전류-전압 특성에서 ΔI 및 $\tan\delta$ -전압 특성에서 $\Delta \tan\delta$ 와 마찬가지로 부분방전의 크기도 매우 작기 때문에 수력발전기 고정자 권선은 절연열화가 거의 발생하지 않았으며, 절연재료의 상태가 매우 양호하게 평가되었다.

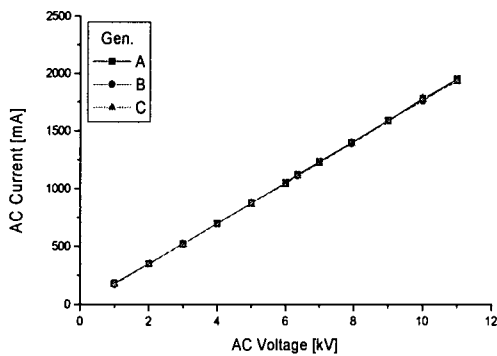


그림 10 수력발전기 1호기의 교류전류-전압 특성

Fig. 10 AC current-voltage characteristics of hydrogenerator #1

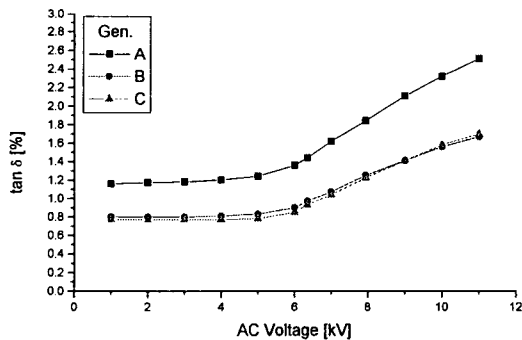


그림 11 수력발전기 1호기의 tanδ-전압 특성

Fig. 11 Tanδ-voltage characteristics of hydrogenerator #1

4. 결론

운전중인 2대의 수력발전기 고정자 권선에서 부분방전 분석기(PDA)를 사용하여 NQN과 Qm 크기의 주기적인 분석과 수력발전기 1호기 정지중 진단 결과를 종합적으로 평가하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수력발전기 1호기 C1과 C2 커플러 센서와 2호기 C1 커플러 센서에서 측정된 NQN과 Qm 크기는 2호기 C2 커플러 센서에 비해 낮게 분석되었다. 또한, 수력발전기 고정자 권선에서 각 상별로 분석된 부분방전 패턴이 1호기 B상-C2 커플러 센서는 도체표면에서 방전, 1호기 A상-C2와 C상-C2 커플러 센서, 2호기 A, B, C상의 C1과 C2 커플러 센서는 모두 내부방전 및 1호기 A상-C1, B상-C1 및 C상-C1 커플러 센서는 슬롯방전으로 분석되어 위치별로 결합상태를 확인할 수 있었다.
- (2) 수력발전기 고정자 권선에서 최근 4년 동안 12차례 NQN과 Qm의 추이를 측정된 결과 4가지 형태로 분류할 수 있었으며, 2대의 수력발전기 고정자 권선의 절연상태가 모두 양호하게 평가되었다. 따라서 운전중인 수력발전기에서 주기적으로 NQN과 Qm의 추이 분석을 통해 고정자 권선의 절연열화 상태를 사전에 예측할 수 있는 매우 중요한 근거가 되고 있다.
- (3) 수력발전기 1호기에서 NQN과 Qm의 추이가 급격하게 증가함에 따라 정지하고 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기를 정밀하게 분석한 결과 매우 양호하게 평가되어 외부 노이즈에 의한 일시적인 현상으로 판명되었다.

참고 문헌

- [1] 김희동, "운전중인 대형 터빈발전기에서 절연상태 평가", 대한전기학회 논문지, Vol. 53C, No. 6, pp. 324~329, 2004.
- [2] 김희동, 주영호, "양수발전소 발전-전동기 운전중 감시 시스템 개발", 대한전기학회 논문지, Vol. 53C, No. 3, pp. 168~174, 2004.
- [3] 김희동, "수력발전기 고정자 권선에서 부분방전 특성", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회, pp. 86~90, 2000.
- [4] G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding and W. McDermid, "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Rotating Machines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 567~577, 1995.
- [5] W. McDermid and J. C. Bromley, "Experience with Directional Couplers for Partial Discharge Measurements on Rotating Machines in Operation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, pp. 175~181, 1999.
- [6] V. Warren, G. C. Stone and M. Fenger, "Advancements in Partial Discharge Analysis to Diagnose Stator Winding Problems", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 497~500, 2000.
- [7] G. C. Stone, Partial Discharge Seminar, Iris Power Engineering Inc., Vol. 1, pp. 56~78, 2005.
- [8] A. Wilson, "Slot Discharge Damage in Air Cooled Stator Winding", IEE Proceedings-A, Vol. 138, No. 3, pp. 153~160, 1991.

- [9] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No 6, pp. 1021-1025, Dec. 1986.

저 자 소 개



김 희 동 (金熙東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년 일본 큐슈공업대학교 초빙연구원. 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5461

Fax : 042-865-5304

E-mail : hdkim@kepri.re.kr



김 병 한 (金秉漢)

1957년 1월 22일생. 1989년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1999년 한양대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 충남대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 한전 전력연구원 책임전문원

Tel : 042-865-5451

Fax : 042-865-5304

E-mail : kbhan@kepco.co.kr